

Effizientere Flugtriebwerke - durch verbesserte Rechenmodelle

Transiente implizite thermomechanische FEM-Simulation extrem detaillierter Flugtriebwerksmodelle II

M. Kober, A. Kühhorn, M. Golze, Institut für Verkehrstechnik - Lehrstuhl Strukturmechanik und Fahrzeugschwingungen, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

Kurzgefasst

- Extrem detaillierte thermomechanische Flugtriebwerksmodelle
- Nichtlinearitäten (Kontakt, Material, Geometrie)
- Implizite transiente Simulation über mehrere Sekunden
- Schnell rotierende elastische Strukturen

Um das Betriebsverhalten realer Flugzeugtriebwerke z.B. hinsichtlich der Spaltweiten, welche große Bedeutung für die Gesamteffizienz haben, möglichst genau vorherzusagen, werden immer detailliertere FEM-Modelle benötigt. In einem sogenannten High-Fidelity-Modell existieren keinerlei Vereinfachungen oder Idealisierungen von Bauteilen mehr. Dies führt auf sehr große Modelle mit mehreren Millionen Freiheitsgraden. Bisher wurden thermomechanische Berechnungen mit derartigen Modellen nur mit Hilfe von expliziten Zeitintegrationsverfahren durchgeführt. Diese bedingen jedoch aus Stabilitätsgründen sehr kleine Zeitschrittweiten, was wiederum zu entsprechend langen Rechenzeiten führt, wenn die Simulationszeiträume größer werden.

In diesem Vorhaben sollen daher die Möglichkeiten der Nutzung impliziter Zeitintegrationsverfahren untersucht werden, da bei angestrebten Simulationszeiten von mehreren Sekunden eines laufenden Triebwerks, die Rechenzeiten bei expliziter Zeitintegration mehrere Monaten betragen würden, selbst wenn die Anzahl der nutzbaren CPU's in der Größenordnung einiger tausend läge.

Im Vergleich zur expliziten Zeitintegrationsverfahren stellen bei impliziter Zeitintegration insbesondere die größeren Zeitschritte eine Herausforderung, beispielsweise bei der Kontaktiteration, dar. Auch die Stabilität des Zeitintegrationsverfahrens für schnell rotierende elastische Strukturen kann kritisch sein [1].

In vielen Voruntersuchungen an akademischen Beispielen wurden verbesserte Integrationsverfahren (z.B. Newmark-Euler, [2]) und genauere Kontaktformulierungen entwickelt und erprobt und sollen

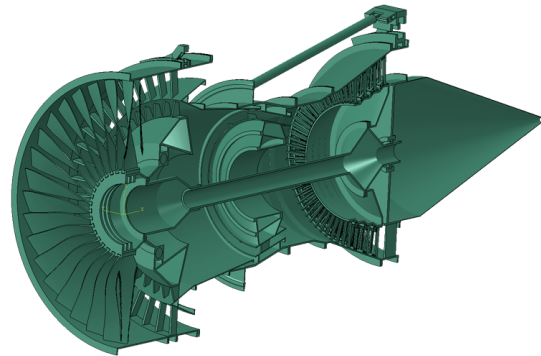


Abbildung 1: «Dummy-Engine»-Modell, alle wesentlichen Baugruppen (Stator, Rotoren, Gehäuse, Wellen) sind modelliert

nun an einem fiktiven aber realistischen Triebwerksmodell, Abbildung 1, welches alle wesentlichen Komponenten enthält, getestet werden.

Darüber hinaus sollen neu implementierte Verfahren zur Beschleunigung der Berechnung, wie z.B. Matrix Re-Order Re-use oder Metis [3], angewandt werden. Der Geschwindigkeitsgewinn derartiger Verfahren macht sich nur bei sehr großen Modellen, wie sie hier vorliegen, bemerkbar.

Ergebnisse des ersten Projektabschnitts

Mit Hilfe des Dummy-Engine-Modells konnte erstmals demonstriert werden, dass eine transiente implizite dynamische Rechnung über einen für hochdynamische Prozesse sehr langen Zeitraum mit derart komplexen, rotierenden FEM-Modellen überhaupt möglich ist. Hierzu konnte die in [4] entwickelte Strategie zur Umgehung der Instabilitätsproblematik bei elastischen rotierenden Strukturen erfolgreich angewendet werden.

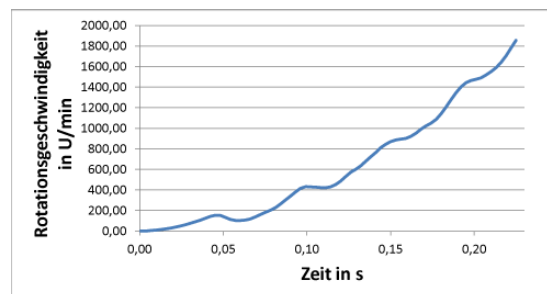


Abbildung 2: Verlauf der Rotationsgeschwindigkeit

Abbildung 2 zeigt den Verlauf der Rotationsgeschwindigkeit des Rotors für eine linear ansteigende Drucklast auf den Turbinenschaufeln während eines

stark beschleunigten Hochlaufs des Triebwerks. Es ist zu erkennen, dass die Rotationsgeschwindigkeit nicht, wie bei einem starren Rotor zu erwarten, quadratisch ansteigt, sondern, aufgrund der entstehenden Schaufelvibrationen und der sich damit ständig ändernden Kontakt- und Impulserhaltungsbedingungen, schwankt.

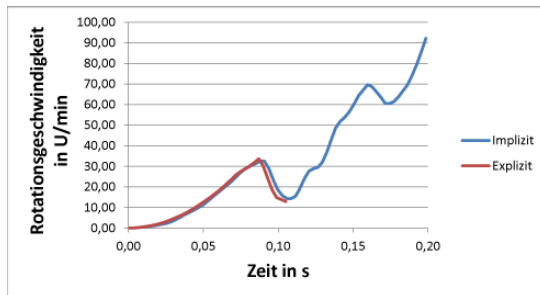


Abbildung 3: Vergleich des expliziten und impliziten Ergebnisses

Der Vergleich zu den Ergebnissen einer klassischen expliziten Berechnung offenbart eine sehr gute Übereinstimmung der Resultate (siehe Abbildung 3). Ein deutlicher Unterschied besteht jedoch in der benötigten Rechenzeit. Während für die implizite Rechnung auf 320 Kernen für die ersten 0,1s insgesamt 76h benötigt wurden, benötigte der explizite Solver für dasselbe Modell 158h auf 3360 Kernen. Dies bedeutet einen Geschwindigkeitsvorteil für die implizite Lösung um etwa den Faktor 20, wobei beide Rechnungen komplett in core abliefen.

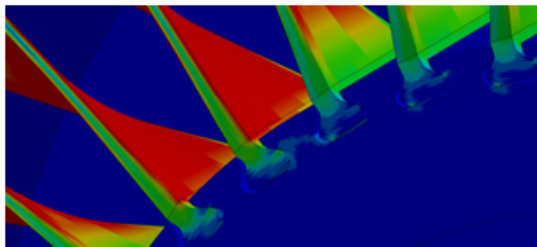


Abbildung 4: Von Mises-Spannungen im Bereich der Fan-Blade-Füße

Um den Gewinn aus ingenieurtechnischer Sicht aus derartigen Rechenmodellen zu verdeutlichen, sei auf Abbildung 4 verwiesen. Hier ist die von Mises-Spannung in einem Fuß eines Fan-Blades zu einem bestimmten Zeitpunkt dargestellt. Derartige Berechnungen wurden bisher typischerweise mit kleineren Einzelmodellen und entsprechenden angenommenen oder aus anderen Modellen übertragenen, fehlerbehafteten Randbedingungen durchgeführt. Bei den hier betrachteten komplexen Modellen können diese Zwischenschritte komplett entfallen. Im zweiten Projektabschnitt ist nun geplant, die implizite Rechnung mit den zuvor erwähnten Maßnahmen weiter zu beschleunigen sowie optimierte Zeitinte-

grationsparameter zu verwenden, um die numerische Dämpfung der Newmark-Euler-Zeitintegration zu reduzieren [5].

WWW

<https://www.b-tu.de/fg-strukturmechanik/>

Weitere Informationen

- [1] M. Kober, A. Kühhorn, A. Keskin, «Implicit Time Integration Schemes for the FEM Simulation of Fast Rotating Structures.» *World Congress on Computational Mechanics & Asia Pacific Congress on Computational Mechanics*, Seoul, Süd-Korea (2016)
- [2] K.-J. Bathe, M.M.I. Baig, «On a composite implicit time integration procedure for nonlinear dynamics.» *Computers and Structures* **83**, pp. 2513-2524 (2005)
- [3] G. Karypis, V. Kumar, «A Fast and High Quality Multilevel Scheme for Partitioning Irregular Graphs.» *SIAM Journal on Scientific Computing* **20** (1), pp. 359-392 (1998)
- [4] M. Kober, A. Kühhorn, «Stable implicit time-integration of flexible rotating structures - explanation for instabilities and concepts for avoidance.» *Applied Mathematical Modelling* **60**, pp. 235-243 (2018)
- [5] M. Kober, A. Kühhorn, A. Keskin, «Optimierung der Newmark-Euler-Zeitintegrationsparameter für eine stabile und effiziente implizite Simulation rotierender elastischer Strukturen.» *Vortrag eingereicht beim LS-Dyna-Forum*, Bamberg, Germany (2018)

Projektpartner

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, Blankenfelde-Mahlow

Förderung

Dieses Vorhaben wird gefördert durch das Land Brandenburg und den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung im Rahmen von VITIV (Virtuelle Interdisziplinäre Triebwerksauslegung mit integrativen Verfahren, Projektnummer 80164702).